

УДК 556.314:550.344.37:550.34.013.4

АНОМАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД В СВЯЗИ С КАМЧАТСКИМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ 02.03.1992 г. ($M_w=6.9$)

© 2012 г. Г.Н. Копылова, С.В. Болдина

Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

Анализируются гидрогеохимические аномалии, зарегистрированные в изменении химического состава воды самоизливающихся скважин Морозная-1 и Пиначево-ГК-1 на Камчатке в связи с землетрясением 02.03.1992 г. ($M_w=6.9$). С использованием модели смешивания двух контрастных по химическому составу вод в водоносных системах скважин рассмотрены процессы формирования выделенных гидрогеохимических предвестников и постсейсмических эффектов. Оценены времена релаксации флюидного давления и движения потока смешанных вод в водоносных системах и стволах скважин на стадии подготовки землетрясения. На модели водоносной системы в виде среды с двойной пористостью оценены химические составы смешивающихся вод для скважины Морозная-1, в которой на стадии подготовки землетрясения увеличивалось поступление воды с повышенной концентрацией сульфат-иона, кальция и натрия из слабопроницаемых блоков в систему трещин.

Ключевые слова: самоизливающаяся скважина, химический состав подземных вод, химический анализ, землетрясение, гидрогеохимический предвестник, моделирование, водоносная система.

Введение

Один из методов поиска предвестников землетрясений – гидрогеохимические наблюдения на самоизливающихся скважинах и источниках, включающие систематический отбор проб воды и их химический анализ с определением концентрации различных компонентов. В результате формируются временные ряды концентрации исследуемых компонентов, в которых могут выделяться аномалии, вызванные процессами подготовки землетрясений (гидрогеохимические предвестники), а также постсейсмические эффекты.

Аномалии макрокомпонентного состава подземных вод регистрировались в связи с рядом сильных землетрясений в районах Альпийского (Средняя Азия, Кавказ, Турция) и Тихоокеанского (Япония, Камчатка) сейсмических поясов [Thomas, 1988; Копылова, Сугробов, Хаткевич, 1994; Хаткевич, Рябинин, 2004, 2006; Wang et al., 2004; Копылова, 2006; Рябинин, Хаткевич, 2009]. Однако сейсмопрогностическая информативность рассматриваемого метода не имеет окончательной оценки. В частности, не определена зависимость предвестниковых гидрогеохимических аномалий от локальных гидрогеологических условий и особенностей наблюдательных скважин; слабо освещен вопрос о том, какие процессы в природно-технических системах “скважина – водовмещающая порода” обеспечивают формирование гидрогеохимических аномалий. Одним из методов эффективного решения таких вопросов является моделирование аномалий в изменении химического состава подземной воды, свободно изливающейся из скважины или источника.

Рассмотрим особенности природно-технических систем “самоизливающаяся скважина – водоносная система” и метода наблюдений, которые необходимо учитывать при моделировании. Эти особенности определяются рядом факторов – техническим строением скважин; расходом изливающейся воды (Q , $\text{дм}^3/\text{с}$); минерализацией и химическим составом подземных вод; составом, структурой и фильтрационными свойствами водовмещающих пород, а также условиями формирования гидрогеохимического

режима. Для каждой наблюдательной скважины необходимо оценивать объем воды в стволе (V , м³) и время ее разгрузки за счет самоизлива ($T=0.001V/Q$, с). При характерных объемах воды в стволе от единиц до десятков кубометров и расходе изливающейся воды от $n \cdot 0.01$ до $n \cdot 0.1$ дм³/с время разгрузки T может колебаться от первых часов до первых лет. Величину T следует учитывать при оценке времени формирования гидрогеохимической аномалии в водоносной системе скважины.

Существенными элементами метода гидрогеохимических наблюдений являются периодичность отбора проб воды (Δt) и оценка чувствительности (точность, относительные ошибки) определения отдельных компонентов состава воды (Δ) в соответствии с методикой химического анализа.

Пусть x_i – аналитически определенная концентрация i -го компонента состава воды, мг/л; Δ_i – относительная ошибка его определения, %. В таком случае концентрация компонента X_i может принимать множество значений в интервале

$$X_i = x_i \pm 0.01\Delta_i x_i. \quad (1)$$

Вода в пробах, отбираемых из скважин, представляет собой слабоминерализованный раствор, состоящий из воды и положительно и отрицательно заряженных ионов (катионов K^+ и анионов A^-). Если концентрация A^- и K^+ выражается в ммоль/дм³, то для растворов выполняется условие электрической нейтральности:

$$\sum K_i^+ = \sum A_j^-, \quad (2)$$

которое служит критерием правильности определения химического состава отобранной пробы воды.

Ошибка анализа определяется соотношением

$$O = \left| \sum K^+ - \sum A^- \right| / \left(\sum K^+ + \sum A^- \right) \cdot 100\%.$$

Результаты анализа считаются правильными и могут быть использованы по целевому назначению при $O \leq 5-10\%$ (в зависимости от сложности химического состава воды).

В основе моделирования гидрогеохимических аномалий лежат представления о механизме их формирования и соответствующие функциональные зависимости. Возможные механизмы образования гидрогеохимических аномалий на стадии подготовки землетрясений подробно рассматривались в [Thomas, 1988]; среди них: 1 – физико-химическое выделение вещества из минерального скелета породы при ультразвуковой вибрации; 2 – химическое выделение вещества из минерального скелета вследствие увеличения его растворимости при росте давления; 3 – физическое выделение вещества при разрушении пор; 4 – химическое выделение вещества с активных поверхностей горной породы при развитии в ней трещиноватости; 5 – физическое смешивание вод с различным химическим составом при нарушении структуры водовмещающей породы. В результате анализа этих механизмов с привлечением данных лабораторных экспериментов и режимных наблюдений в [Thomas, 1988] делается вывод, что модель смешивания вод, имеющих разный химический состав, наиболее универсальна для объяснения гидрогеохимических аномалий в составе подземных вод.

Гидродинамический анализ смешивания двух различных по составу вод в зоне повышенной водопроницаемости в водовмещающих породах для фоновых и возмущенных условий приводится в [Wang et al., 2004]. В этой работе показано, что в возмущенных условиях изменение концентрации компонента в изливающейся из скважины смешанной воде может описываться зависимостью:

$$\delta\sigma(t) = \delta\sigma_0 \frac{e^{t/t_0} - e^{-t/\tau_0}}{(1 - \tau_0/t_0)(\tau_0/t_0)^{t_0/(t_0 - \tau_0)}} + \text{const}, \quad (3)$$

где $\delta\sigma(t)$ – изменение концентрации компонента во времени t , мг/л; $\delta\sigma_0$ – амплитуда изменения концентрации компонента, мг/л; t_0 – время релаксации импульса давления в

водоносной системе, сут; τ_0 – время движения потока смешанной воды, сут. Последние два параметра характеризуют возмущенное гидродинамическое состояние водоносной системы.

Амплитуда изменения концентрации $\delta\sigma_0$ для каждого исследуемого компонента при моделировании гидрогеохимических аномалий с использованием зависимости (3) может быть оценена по данным наблюдений. Величины t_0 и τ_0 определяются подбором при минимальном расхождении модели и наблюдаемых данных по всем основным макрокомпонентам воды. При моделировании гидрогеохимических аномалий необходимым является учет ошибок определения каждого компонента в составе воды Δ_i и электрической нейтральности подземной воды (2).

Некоторые примеры моделирования постсейсмических эффектов с использованием зависимости (3) приводятся в работах [Wang et al., 2004; Копылова, Воронаев, 2006]. В частности в них рассмотрены результаты моделирования изменений электропроводности воды в скважине КАТ в Армении, связанных с Измитским землетрясением 17.08.1999 г. ($M_w=7.6$), и изменений концентрации хлор-иона в воде Пиначевского источника 1 на Камчатке при шести землетрясениях, произошедших в 1977–1993 гг. с магнитудой от 5.0 до 7.4. Расчетные изменения параметров химического состава подземных вод удовлетворительно согласовались с их наблюдаемыми постсейсмическими вариациями.

В настоящей работе моделирование на основе изложенного выше подхода применяется для анализа зарегистрированных перед Камчатским землетрясением 02.03.1992 г. ($M_w=6.9$) гидрогеохимических аномалий в изменениях химического состава воды в двух самоизливающихся скважинах – Морозная-1 (далее скв. М-1) и Пиначево-ГК-1 (далее скв. ГК-1). В соответствии с типизацией гидрогеосейсмических вариаций в режиме подземных вод [Копылова, 2006] выявленные изменения в состоянии подземных вод относятся к гидрогеохимическим предвестникам и постсейсмическим эффектам.

Гидрогеосейсмические вариации в изменениях химического состава подземных вод в скв. М-1 и скв. ГК-1 в период Камчатского землетрясения 02.03.1992 г. ($M_w=6.9$)

Рассмотрим аномалии в изменениях составов вод из самоизливающихся скв. М-1 и скв. ГК-1, связанные с землетрясением 02.03.1992 г. ($M_w=6.9$, $I=5-6$ баллов) [Зобин и др., 1996], произошедшим на расстоянии 135 км от скважин. Характеристика скважин, методика наблюдений и анализа данных, описание гидрогеохимических аномалий приводятся в [Копылова, Сугробов, Хаткевич, 1994; Хаткевич, Рябинин, 2004, 2006]. Основные данные о скважинах и информация, необходимая для интерпретации результатов моделирования, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристика наблюдательных скважин

| Скважина | Координаты | | Глубина, м | Перфорация ствола скважины, м | Дебит Q , $\text{дм}^3/\text{с}$ | Объем воды в стволе V , м^3 | Время полного водообмена в стволе скважины, T | Временной интервал отбора проб Δt , сут |
|-----------|------------|--------|------------|-------------------------------|------------------------------------|--|---|---|
| | °с.ш. | °в.д. | | | | | | |
| Скв. М-1 | 53.28 | 158.40 | 600 | 310–313, 407–410, 553–556 | 1.5–1.3 | 7.3 | 1.0–1.6 ч | 3 |
| Скв. ГК-1 | 53.21 | 158.31 | 1261 | 400–1261 | 0.1 | 16.2 | 1.9 сут | |

Скв. М-1 глубиной 600 м вскрывает в интервалах 310–313, 407–410 и 553–556 м трещинно-жильные напорные подземные воды в миоценовых туфах андезитового состава. Для водовмещающих пород характерны повсеместная пропилитизация и трещиноватость. Гидрогеохимическая аномалия в скважине проявилась перед землетрясением увеличением минерализации воды на 30% и изменением гидрогеохимического типа воды за счет относительного увеличения концентрации SO_4^{2-} и уменьшения HCO_3^- . Химический состав воды соответствовал формулам: $\text{M}_{0.19}(\text{SO}_4 78 \text{ HCO}_3 20)/(\text{Ca} 56 \text{ Na} 44)$ – в фоновых условиях, т.е. до развития аномалии; $\text{M}_{0.25}(\text{SO}_4 87 \text{ HCO}_3 11)/(\text{Ca} 55 \text{ Na} 45)$ – на экстремальной стадии аномалии. В представленных формулах концентрация анионов и катионов выражены в % моль, $\text{M}_{0.19}$ – минерализация воды в г/дм³. Ошибки химических анализов отдельных проб воды составляли $O=1\text{--}6\%$. Относительные ошибки определения концентраций отдельных макрокомпонентов $\Delta_i=2\text{--}10\%$ [Хаткевич, Рябинин, 2004].

Графики изменения концентрации четырех макрокомпонентов и результаты расчетов с использованием зависимости (3) при учете ошибок химического анализа каждого компонента по формуле (1) представлены на рис. 1. Отмечается удовлетворительное соответствие модели наблюдаемым данным при параметрах $t_0=20$ сут и $\tau_0=50$ сут.

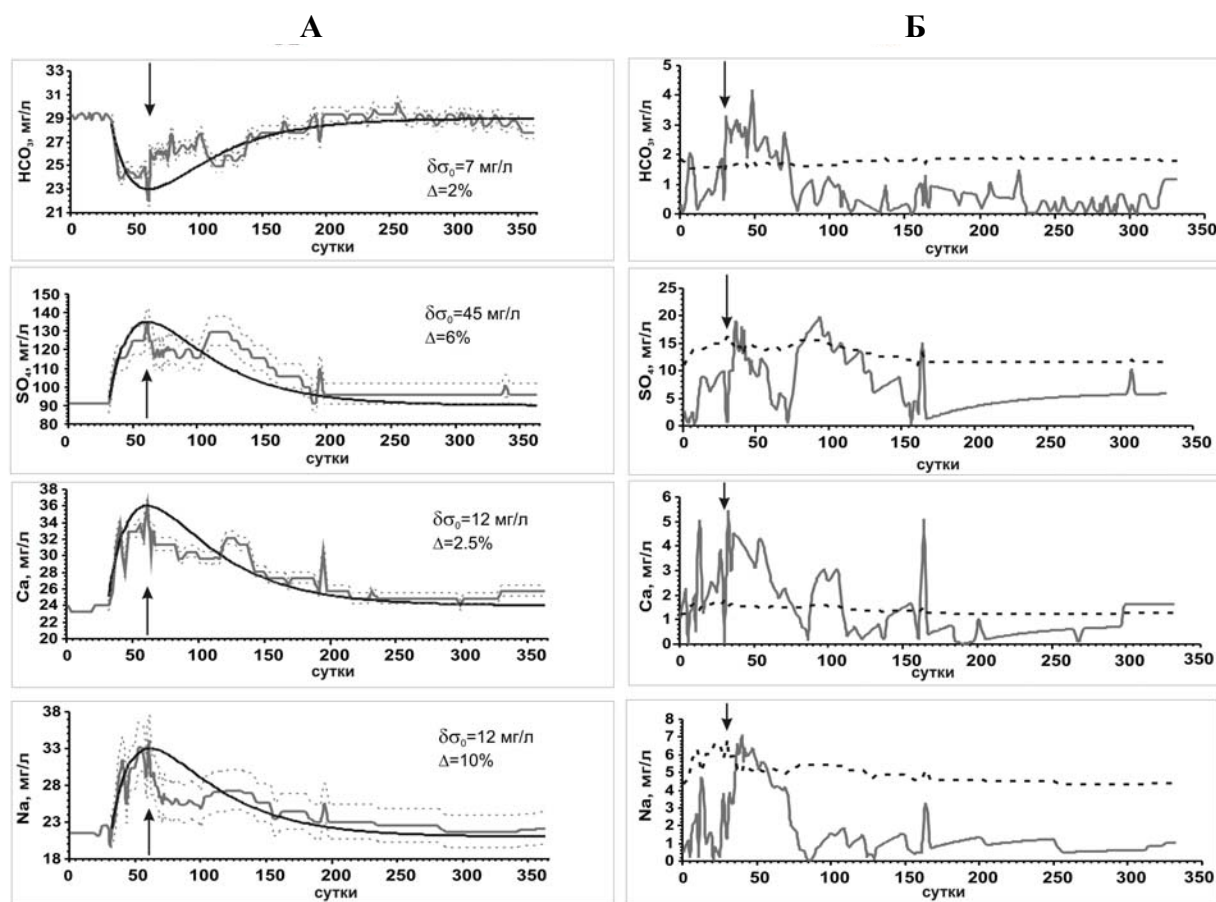


Рис. 1. Скв. М-1. **А.** Изменение концентрации макрокомпонентов HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Na^+ в воде в связи с землетрясением 02.03.1992 г. в сопоставлении с результатами моделирования с использованием зависимости (3) при $t_0=20$ сут и $\tau_0=50$ сут: серые линии – данные наблюдений; черные – расчетные изменения концентраций; пунктирные – границы интервалов изменения концентрации с учетом ошибки определения Δ_i по (1); $\delta\sigma_0$ – амплитуда изменения концентрации на стадии аномалии; стрелкой отмечен момент землетрясения. **Б.** Изменение абсолютных величин разности между измеренной концентрацией и расчетными значениями (сплошные линии) в сопоставлении с двойной ошибкой определения каждого значения концентрации (пунктирная линия)

Некоторое несоответствие модели экспериментальным данным наблюдается непосредственно после землетрясения в течение первых десятков суток (см. рис. 1, Б). Наиболее вероятная причина этого – наложение эффекта от сейсмических сотрясений на развитие предвестниковой аномалии. После землетрясения, т.е. на постсейсмической стадии, происходило относительное увеличение концентрации HCO_3^- и уменьшение концентраций SO_4^{2-} , Ca^{2+} и Na^+ по отношению к развитию предвестникового эффекта (см. рис. 1, А). Это свидетельствует о том, что на постсейсмической стадии изменение химического состава воды было обратным по отношению к предвестниковому эффекту.

Скв. ГК-1 на глубинах 400–1261 м вскрывает трещинные термоминеральные воды азотно-метанового состава. Водовмещающими породами являются плиоценовые туфы андезит-базальтового состава и трещиноватые песчаники позднемелового возраста. Химический состав воды в скв. ГК-1 соответствует формуле $\text{M}_{10}\text{Cl}_{98}/(\text{Na}_{68}\text{Ca}_{27})$.

На стадии подготовки землетрясения аномалия проявилась в уменьшении концентрации Cl^- на 180 мг/л (или на 3%) по отношению к фоновой (рис. 2, А). На постсейсмической стадии происходило увеличение концентрации Cl^- . В изменениях концентрации Na^+ и Ca^{2+} эффект подготовки землетрясения проявился менее отчетливо.

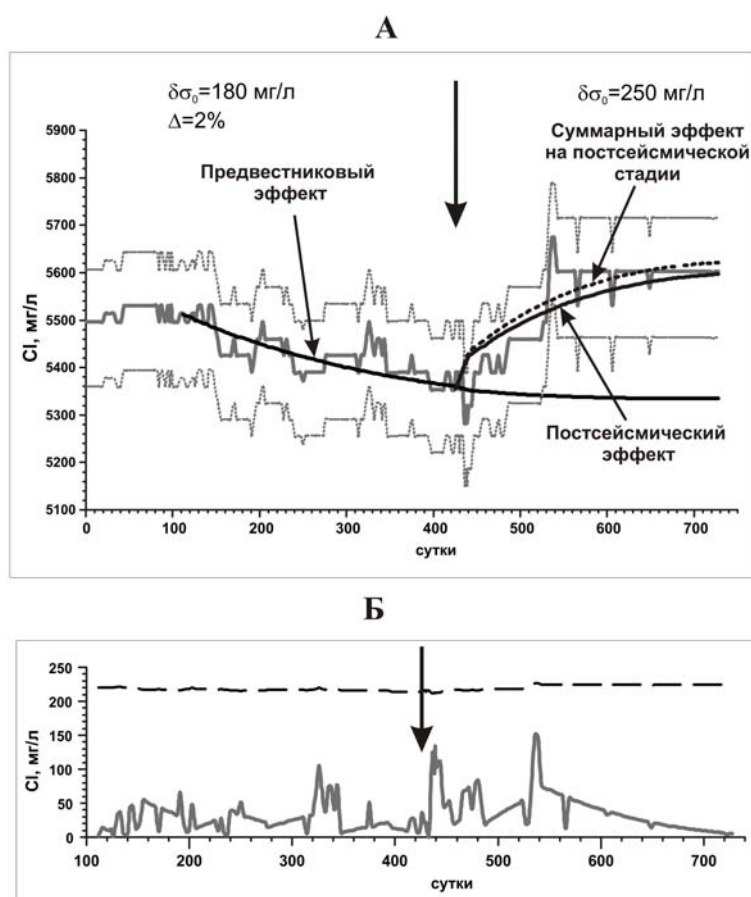


Рис. 2. Скв. ГК-1. **А.** Изменение концентрации Cl^- в воде в связи с землетрясением 02.03.1992 г. и результаты моделирования предвестникового ($t_0=120$ сут, $\tau_0=350$ сут) и постсейсмического ($t_0=90$ сут, $\tau_0=200$ сут) эффектов с использованием зависимости (3): серые линии – данные наблюдений; пунктирные – границы интервала изменения концентрации Cl^- с учетом ошибки определения Δ по (1); черные сплошные линии – расчетные изменения концентрации на предвестниковой и постсейсмической стадиях; черная пунктирная линия – суммарный эффект двух процессов на постсейсмической стадии. **Б.** Изменение абсолютных величин разности между измеренными концентрациями Cl^- и их расчетными значениями (сплошная линия) в сопоставлении с двойной ошибкой определения каждого значения концентрации Cl^- (пунктирная линия)

Моделирование проводилось отдельно для предвестникового и постсейсмического эффектов только по изменениям концентрации Cl^- . Отсутствие четких гидрогеосейсмических вариаций в изменении концентрации Na^+ и Ca^{2+} не позволяет использовать данные по катионам в расчетах, что снижает обоснованность результатов моделирования гидрогеохимической аномалии для скв. ГК-1. Вместе с тем, наши результаты показывают, что концентрация Cl^- в воде водоносной системы скв. ГК-1 на стадии подготовки землетрясения закономерно уменьшалась, а на постсейсмической стадии увеличивалась.

Расчет состава смешивающихся вод в водоносной системе скв. М-1

Результаты моделирования позволяют полагать, что в водоносной системе скв. М-1 происходило смешивание двух, имеющих разный химический состав вод, которые поступают в ствол через три перфорированных участка (табл. 1; рис. 3, Б).

Для оценки состава смешивающихся вод модель водоносной системы принималась в виде среды с двойной пористостью [Баренблатт, Желтов, 1960] (рис. 3, А). В такой среде основной поток подземных вод перемещается по системе взаимосвязанных трещин. Трещины разделяют слабопроницаемые блоки, в пустотах которых содержится гравитационная и физически связанная вода с повышенной минерализацией. При фоновых условиях химический состав смешанной воды, изливающейся из скважины, остается стабильным, так как имеет место стационарный режим водообмена между трещинами и блоками. В процессе подготовки землетрясения происходит изменение гидродинамических условий в водоносной системе, и стационарный режим водообмена нарушается: меняются соотношения между смешивающимися водами и химический состав изливающейся из скважины воды.

При расчете состава двух вод принимались линейные условия их смешивания в водоносной системе: $C = nC_1 + mC_2$, $n + m = 1$, где C – концентрация компонента в смешанной воде (рис. 3, Б), C_1 – концентрация компонента в трещинах, C_2 – концентрация компонента в “блоках” (рис. 3, А), n и m – доли вод из трещин и блоков в смешанной воде, в фоновых условиях $n > m$.

Граничные значения C_1 и C_2 (в мг/л) в смешивающихся водах оценивались по данным наблюдений. Для HCO_3^- принималось $C_1 > 31.2$ и $C_2 < 22$, для SO_4^{2-} $C_1 < 77$, $C_2 > 134.5$; для Na^+ $C_1 < 21$, $C_2 > 34.2$; для Ca^{2+} $C_1 < 23$, $C_2 > 36$. Также принималось условие электрической нейтральности растворов (2) и задавалась ошибка “условного анализа” катионов и анионов во всех трех растворах $O \leq 6\%$. При таких условиях решения были получены для величин n в интервале 0.9–0.7 и, соответственно, $m = 0.1$ –0.3. Расчетные составы смешивающихся вод приведены в табл. 2.

При определении долей смешивающихся вод на стадии аномалии (n' и m') использовались их расчетные составы. Также проводилась проверка на устойчивость отношения n'/m' по отдельным катионам и анионам и по всем их возможным парам (катион–катион, анион–анион, анион–катион).

Расчеты показали, что в “трещинах” присутствует вода гидрокарбонатно-сульфатного натриево-кальциевого состава с минерализацией 0.14–0.17 г/л. Минерализация воды в “блоках” может составлять 0.30–0.37 г/л, ее состав – сульфатный натриево-кальциевый. Предвестниковая гидрогеохимическая аномалия в изливающейся воде обусловлена увеличением доли растворенного вещества из “блоков” и уменьшением его доли из “трещин”. В результате сейсмических сотрясений происходило относительно кратковременное увеличение доли воды из “трещин” в изливающейся воде.

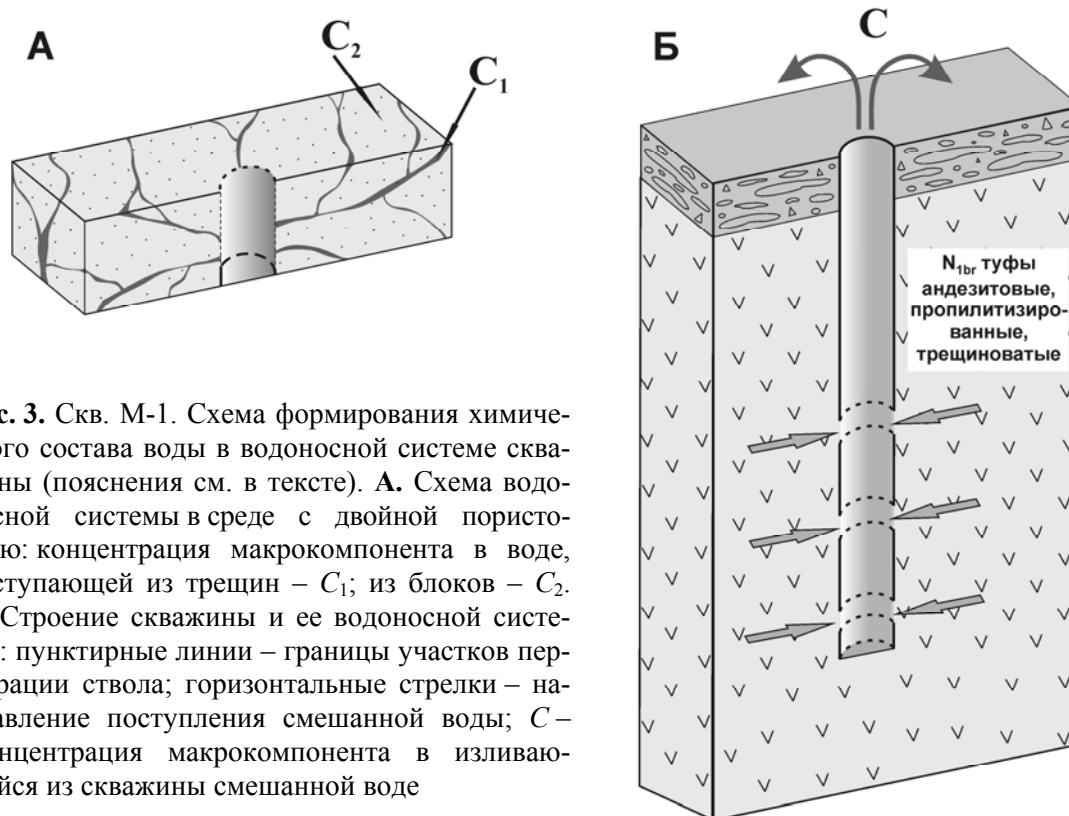


Рис. 3. Сква. М-1. Схема формирования химического состава воды в водоносной системе скважины (пояснения см. в тексте). **А.** Схема водоносной системы в среде с двойной пористостью: концентрация макрокомпонента в воде, поступающей из трещин – C_1 ; из блоков – C_2 . **Б.** Строение скважины и ее водоносной системы: пунктирные линии – границы участков перфорации ствола; горизонтальные стрелки – направление поступления смешанной воды; C – концентрация макрокомпонента в изливающейся из скважины смешанной воде

Таблица 2. Расчетные составы смешивающихся вод в водоносной системе скв. М-1 (пояснения см. в тексте)

| Состав воды | | Соотношение долей смешивающихся вод | |
|--|---|-------------------------------------|-------------------------|
| в трещинах (C_1) | в блоках (C_2) | фоновые условия n/m | стадия аномалии n'/m' |
| $M_{0.17}(SO_4^{4-}72 HCO_3^{2-}25)/$ (Ca53 Na46) | $M_{0.37}(SO_4^{4-}97 HCO_3^{2-}2)/$ (Ca66 Na34) | 0.9/0.1 | 0.6/0.4 |
| $M_{0.17}(SO_4^{4-}71 HCO_3^{2-}25)/$ (Ca57 Na42) | $M_{0.34}(SO_4^{4-}96 HCO_3^{2-}3)/$ (Ca53 Na46) | 0.87/:0.13 | 0.5/0.5 |
| $M_{0.16}(SO_4^{4-}71 HCO_3^{2-}26)/$ (Ca56 Na43) | $M_{0.32}(SO_4^{4-}90 HCO_3^{2-}8)/$ (Ca54 Na45) | 0.8/0.2 | 0.2/0.8 |
| $M_{0.14}(SO_4^{4-}65 HCO_3^{2-}31)/$ (Ca56 Na43) | $M_{0.30}(SO_4^{4-}90 HCO_3^{2-}8)/$ (Ca55 Na44) | 0.7/0.3 | 0.2/0.8 |

Заключение

Представленные результаты моделирования вариаций макрокомпонентного состава воды двух самоизливающихся скважин на стадии подготовки Камчатского землетрясения и моделирование постсейсмических изменений [Копылова, Воронаев, 2006; Wang et al., 2004] свидетельствуют об эффективности применения модели смешивания контрастных по химическому составу вод в водоносных системах для объяснения гидрогеохимических аномалий. На основе этой модели анализируется динамика зарегистрированных аномалий и с использованием зависимости (3) оцениваются параметры возмущенного гидродинамического состояния водоносной системы: t_0 – время релаксации импульса давления и τ_0 – время движения потока смешанной воды в водоносной системе. Соотношение этих параметров с учетом времени полного водообмена в стволе скважины определяет, в основном, форму и продолжительность развития гидрогеохимической аномалии.

Рассчитанные для разных значений параметров t_0 и τ_0 гидрогеохимические аномалии приведены на рис. 4. На вертикальной оси показаны изменения концентрации компонента химического состава воды в долях амплитуды его максимального изменения на стадии аномалии $\delta\sigma_0$, принятой за единицу.

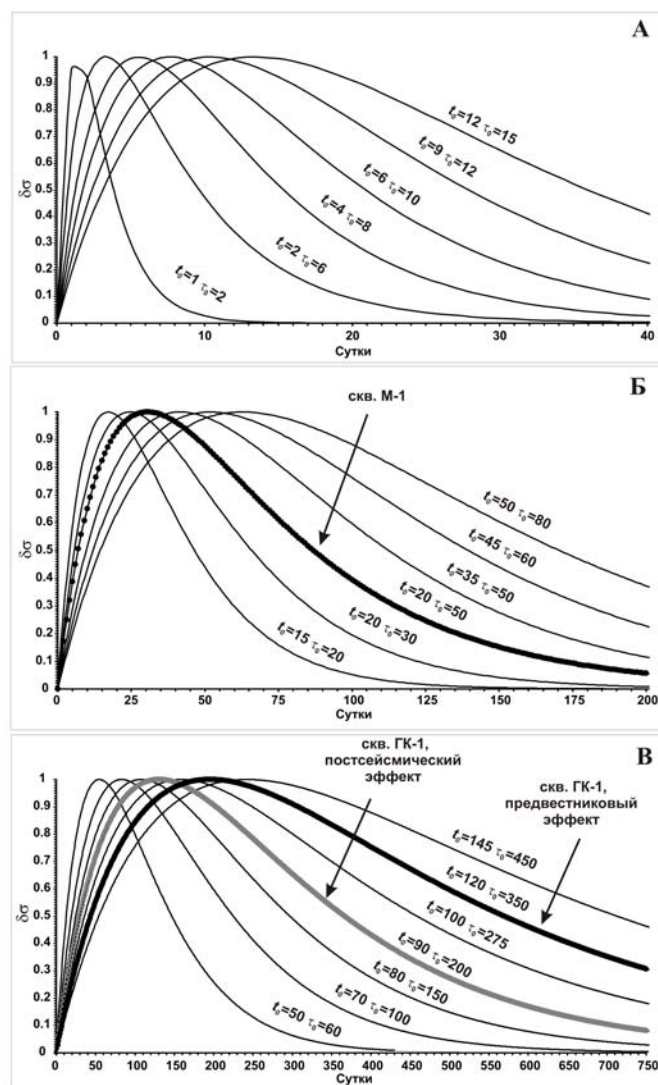


Рис. 4. Изменения концентрации макрокомпонентов в воде на стадии гидрогеохимической аномалии, рассчитанные по зависимости (3) при условной величине $|\delta\sigma_0|=1$ для разных значений параметров t_0 и τ_0 : $t_0=1-12$ сут, $\tau_0=2-15$ сут (А); $t_0=15-50$ сут, $\tau_0=20-80$ сут (Б); $t_0=50-145$ сут, $\tau_0=60-450$ сут (В)

Если параметры t_0 и τ_0 малы (рис. 4, А), то при относительно большой периодичности наблюдений Δt аномалия может не выделяться, либо представление о ее форме будет искажено. Например, гидрогеохимическая аномалия в скв. М-1 (рис. 1, А; рис. 4, Б) по морфологическим признакам в [Копылова, Сугробов, Хаткевич, 1994; Рябинин, Хаткевич, 2009] классифицировалась как “скачкообразная”. В данном случае причиной неверного суждения является “большая” периодичность наблюдений $\Delta t=3$ сут, которая не позволяла оценить реальную форму аномалии по изменениям временных рядов. Но такая периодичность наблюдений оказалась достаточной для оценки нормальных “бухтообразных” форм гидрогеохимических аномалий в изменениях концентрации хлор-иона в воде скв. ГК-1 на стадии подготовки Камчатского землетрясения (рис. 2, А; рис. 4, В;

$t_0=120$ сут, $\tau_0=350$ сут) и его постсейсмического эффекта ($t_0=90$ сут, $\tau_0=200$ сут), а также постсейсмических эффектов в изменениях состава воды Пиначевского источника 1 ($t_0=34-64$ сут, $\tau_0=30-91$ сут [Копылова, Воронаев, 2006]).

Для практического выделения гидрогеохимической аномалии в изменениях отдельного компонента состава воды важно соотношение между амплитудой аномалии $\delta\sigma_0$ и ошибкой химического анализа Δ_i .

Если

$$\delta\sigma_0 \leq |(\sigma_2 \pm 0.01\Delta_i\sigma_2) - (\sigma_1 \pm 0.01\Delta_i\sigma_1)|, \quad (4)$$

где σ_1 – аналитически определенная концентрация компонента в фоновых условиях; σ_2 – экстремальная концентрация компонента на стадии аномалии, то выделение гидрогеохимической аномалии практически невозможно в изменениях временного ряда.

В случае, когда

$$\delta\sigma_0 > |(\sigma_2 \pm 0.01\Delta_i\sigma_2) - (\sigma_1 \pm 0.01\Delta_i\sigma_1)|, \quad (5)$$

гидрогеохимическая аномалия может быть выделена в изменениях соответствующего временного ряда концентрации при достаточной периодичности наблюдений Δt .

Предположим, что периодичность наблюдений Δt составляет 3–10 сут и условие (5) выполняется при $\delta\sigma \geq 0.7$ (см. рис. 4). В этом случае большая часть аномалий на рис. 4, А, Б либо не будет зафиксирована, либо эти аномалии будут выделяться во временных рядах в виде отдельных всплесков, т.е. как скачкообразные или “импульсные”. Адекватно могут диагностироваться во временных рядах только аномалии с параметрами t_0 и τ_0 , соответствующие рис. 4, В.

Приведенные выше результаты, а также разнообразие технических условий и гидрогеологических обстановок формирования химического состава подземных вод в сейсмоактивных регионах требуют совершенствования метода гидрогеохимических наблюдений, направленных на поиск предвестников землетрясений. Для этого необходимо внедрять в практику сейсмопрогностических работ автоматизированные системы высокоточной регистрации изменений концентрации отдельных компонентов и интегральных показателей химического состава воды, таких как соленость и электропроводность, с периодичность не реже одного измерения в час.

На примере скважины М-1 с использованием данных режимных наблюдений и моделирования впервые построена адекватная модель регистрируемой гидрогеохимической аномалии макрокомпонентного состава изливающейся воды, формировавшейся на стадиях подготовки и реализации Камчатского землетрясения 02.03.1992 г. ($M_w=6.9$). Гидрогеохимическая аномалия была связана с изменением условий смешивания в водоносной системе скважины различных по составу вод, содержащихся в трещинах и в относительно слабопроницаемых блоках. Оценены химические составы смешивающихся вод и показано, что на стадии подготовки землетрясения происходило увеличение поступления воды с повышенной минерализацией из слабопроницаемых блоков в трещинную систему. Наиболее вероятным механизмом такого процесса является улучшение гидравлической связи между системой трещин и слабопроницаемыми блоками за счет развития в них микротрещиноватости и, возможно, за счет частичного перехода находящейся в блоках физически связанной воды в свободное состояние. Альтернативным механизмом изменения условий смешивания двух вод является неоднородное (локализованное) распределение вариаций порового давления в трещинах и блоках на стадии подготовки землетрясения и перераспределение расходов взаимодействующих потоков в сторону увеличения расхода из блоков. В этом случае отношение смешивания между двумя различными водами также будет нарушаться, и соответственно, химический состав изливающейся из скважины смешанной воды будет меняться.

Для скв. М-1 предвестниковая гидрогеохимическая аномалия была достаточно надежно зарегистрирована в изменениях временных рядов концентрации всех четырех макрокомпонентов состава воды. Ее выделению также способствовало благоприятное соотношение между периодичностью наблюдений ($\Delta t=3$ сут) и продолжительностью проявления гидрогеохимической аномалии (примерно 26 сут, 8 измерений).

В результате сейсмических сотрясений, сопровождавшихся импульсными динамическими вариациями порового давления в водоносной системе, происходило относительное увеличение разгрузки слабоминерализованной воды из трещин в ствол скважины, которая является областью пониженного давления и постоянным стоком для водоносной системы. К сожалению, при используемой методике и периодичности наблюдений $\Delta t=3$ сут надежное выделение и последующее моделирование постсейсмического эффекта в изменениях химического состава воды скв. М-1 в результате землетрясения 02.03.1992 г. не представляется возможным. Попытки моделирования относительно кратковременных предвестниковых эффектов в изменениях химического состава воды скв. М-1 перед землетрясениями 1993–1997 гг. с $M=6.9-7.8$ [Хаткевич, Рябинин, 2004] также оказались неудачными вследствие очевидных недостатков системы гидрогеохимических наблюдений.

Литература

- Баренблатт Г.И., Желтов Ю.П. Об основных уравнениях фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах // Докл. АН СССР. 1960. Т. 132, № 3. С.545–548.
- Зобин В.М., Гордеев Е.И., Левина В.И. и др. Камчатское землетрясение 2 марта 1992 г. (магнитуда $M_LH=7.1$) в Авачинском заливе и связанные с ним явления // Вулканология и сейсмология. 1996. № 6. С.48–61.
- Копылова Г.Н. Сейсмичность как фактор формирования режима подземных вод // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. № 1. Вып. 7. С.50–66.
- Копылова Г.Н., Воропаев П.В. Процессы формирования постсейсмических аномалий химического состава термоминеральных вод // Вулканология и сейсмология. 2006. № 5. С.42–48.
- Копылова Г.Н., Сугробов В.М., Хаткевич Ю.М. Особенности изменения режима источников и гидрогеологических скважин Петропавловского полигона (Камчатка) под влиянием землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С.53–70.
- Рябинин Г.В., Хаткевич Ю.М. Гидрогеохимические эффекты, предшествующие сильным землетрясениям Камчатки. Алгоритм идентификации и морфологический анализ // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. № 1. Вып. 13. С.107–122.
- Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В. Гидрогеохимические исследования на Камчатке // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. С.96–112.
- Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В. Гидрогеохимические исследования на Камчатке в связи с поиском предвестников землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2006. № 4. С.34–42.
- Thomas D. Geochemical precursors to seismic activity // Pure Appl. Geophys. 1988. V. 126. P.241–266.
- Wang R., Woith H., Milkereit C., Zschau J. Modeling of hydrogeochemical anomalies induced by distant earthquakes // Geophys. J. Int. 2004. V. 157. P.717–726.

Сведения об авторах

КОПЫЛОВА Галина Николаевна – доктор геолого-минералогических наук, доцент, заведующая лабораторией, Камчатский филиал Геофизической службы РАН. 683006, г. Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, д. 9. Тел./факс: 8(4152)43-18-49. E-mail: gala@emsd.ru

БОЛДИНА Светлана Васильевна – научный сотрудник, Камчатский филиал Геофизической службы РАН. 683006, г. Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, д. 9. Тел.: 8(4152)43-18-28. E-mail: boldina@emsd.ru

ANOMALIES IN THE CHEMICAL COMPOSITION OF UNDERGROUND WATER DUE TO THE 2^d MARCH 1992 EARTHQUAKE ($M_w=6.9$), KAMCHATKA

© 2011 г. G.N. Kopylova, S.V. Boldina

*Kamchatka Branch, Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

Abstract. The anomalies in groundwater chemistry due to the 2^d March 1992 Kamcatkan earthquake ($M_w=6.9$) are analyzed taking into account the physical mixing of two chemically contrast fluids in waterbearing stratum connected with the flowing wells Moroznay-1 and Pinachevo-GK-1, Kamchatka. Precursory and postseismic changes were marked out in time series of groundwater chemistry. The transient times of water pressure relaxation and mixed water flow in waterbearing stratum are estimated for the preparation stage of the earthquake. The chemical composition of two mixing waters is estimated for the well Moroznay-1 using the double porosity model for waterbearing stratum. An increase of water inflow with heightened sulphate-ion, calcium and sodium concentrations from low permeability medium into fractures had taking place on the preparation stage of the earthquake.

Keywords: flowing well, chemical composition, chemical analysis, earthquake, hydrochemical precursor, modeling, waterbearing stratum.